研究論文

3次元表面性状計測に関する研究

伊藤俊治＊1　水野和康＊1　河田圭一＊1

Study on Evaluation of 3D-Surface Texture

Shunji ITO, Kazuyasu MIZUNO and Keiichi KAWATA

Industrial Technology Division, AITEC*1

原子間力顕微鏡に装備されているFLATフィルタ以外にウェーブレットフィルタを外部のパソコンで作成し、出力データをフィルタリングすることによって、カンチレバーの走査方向に生ずる多数の筋を除去した。これによれば、ローパスフィルタでは検出できない不連続性状の抽出も可能であった。また、２次元自己相関関数から導き出される数値パラメータを使って、表面性状の不規則性の強弱を数値化できるようにした。このパラメータ値は０以上、１以下であり、不規則性が高いほど小さくなる。規則性と不規則性が混在する３次元表面性状において、不規則性の割合に応じて高低の値をとった。

１．はじめに

表面性状は光学製品、電子デバイス、機械部品など多くの製品において、所望の平滑さや粗さに仕上げられる必要がある。通常、設計者は製品の機能を考慮して、工業規格で定められた方法で表面性状を指示する。しかし、最近の計測技術は著しく進歩し、工業規格外の領域に及んでいる。

そこで、工業規格に規定されていない３次元表面性状計測に関する研究を行い、３次元表面性状のフィルタリング、特徴量の抽出を行った。

原子間力顕微鏡による３次元表面性状計測において、山谷の数が少ない場合、あるいは極めて平滑で計測精度の極限に近い場合、１ラインごとの平均高さを合わせるFLAT フィルタ[1)]では、多数の筋を除去できない問題があった。そこで、昨年度の研究結果[2)]を応用し、１次元ウェーブレットフィルタ[3)]を構成したほか、比較の目的でカイザー窓関数付きの FIR ローパスフィルタ[4)]を作成し、これらを適用した。

また、旋削加工品などにおいては、表面性状に規則性の高いツールマークと不規則性の多いむしれとが混在するのが一般的である。もし、工具の切れ味が良ければ、むしれが少なくなり表面性状の不規則性も小さくなる。そこで、３次元表面性状の不規則性を数値化することを検討した。

２．実験方法

2.1 フィルタリング

2.1.1 ウェーブレットフィルタ

生データf(t)をスケーリング関数[3)]と呼ばれる関数の一次結合で近似する。例えば幅１の矩形パルスをスケーリング関数φ(t)とし、区間［k,k+1］における生データの平均値をs_kとした場合、近似関数$f_j(t)$は次式で表される。

$$f_j(t)=\Sigma s_k \phi(t-k) \qquad (1)$$

ここで、ｊはレベルと呼ばれる近似の精度を表す整数値であり、レベル０が最も精度の高い近似となり、レベルが大きくなるに伴い粗い近似となる。

レベルj-1の近似関数$f_{j-1}(t)$はレベルjの近似関数$f_j(t)$に、粗い近似によって欠落する成分$g_j(t)$を加算したものであり、次式で表される。

$$f_{j-1}(t)=f_j(t)+g_j(t) \qquad (2)$$

ここで、$g_j(t)$はウェーブレット成分と呼ばれる。

図１は、この関係をブロック図で表したものである。

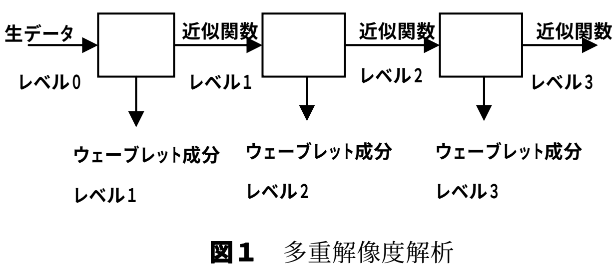


図１　多重解像度解析

*1 工業技術部　機械電子室

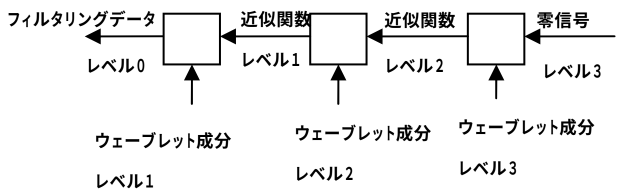


図２　再構成

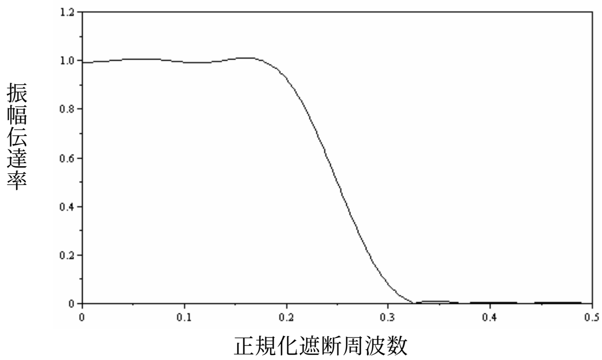


図３　フィルタ特性

同図から、生データを任意の粗さのレベルにおける近似関数とレベル１からレベルＪに至るまでのウェーブレット成分の和で表すことが可能であることが分かる。一般に、生データを１からＪまでのＪ個の解像度、すなわち多重の解像度を持つウェーブレット[3)]を用いて表現することができ、この解析を多重解像度解析[3)]と呼ぶ

多重解像度解析を適当なレベルまで行った後、そのレベルでの近似関数を零に設定する。そして、**図２**のように全ての近似関数とウェーブレット成分を０レベルまで再構成[3)]する。これによってウェーブレットフィルタを作成できる。

カンチレバーの走査方向に直交する方向に１次元ウェーブレットフィルタを適用することによって、ノイズ成分を抽出できる[2)]ので、１ライン分のデータからノイズ成分を除去することにより、断面曲線を求め得る。すべてのラインデータにこの処理を適用することによって、多数の筋として表れる誤差を３次元表面性状から取り除いた。

2.1.2 FIRローパスフィルタ

通常のFIRフィルタによってローパスフィルタを構成する場合、周波数領域において不連続域を有限個の次数の三角関数で近似するので、遮断特性が悪くなったり、リップルが高くなる。これらを改善、あるいは低減する目的で、窓関数としてカイザー窓関数[4)]を適用した。通常、窓関数を用いても、遷移域幅と阻止域最小減衰量との間のトレードオフ関係は存在する。しかし、カイザー窓関数は、トレードオフ関係をより系統的に与えることができる。

また、フランスの国立研究所INRIAで開発されたScilab[5)]はフリーソフトであり、行列演算などをインタープリター形式のプログラムで容易に実行できる。さらに、多くのライブラリーを持ち簡単にプログラムを作成できる利点もある。

そこでカイザー窓関数法を適用した１次元１６次のFIRローパスフィルタをScilab上で作成した。作成したフィルタの特性を**図３**に示す。同図から遷移域幅が小さく、また、通過域と阻止域におけるリップルの小さい高性能なフィルタを構成できていることが分かる。次に、Scilabから獲得される１６個のパラメータを１ラインデータごとに次式によって畳み込むことによってフィルタリングする。

$$y(n) = \Sigma h(m) u(n-m) \qquad (3)$$

n：サンプリング番号　　m：1,2,･･･,16
y(n)：フィルタリング後のデータ
h(m)：パラメータ　　u(n-m)：生データ

2.2 不規則性の数値化

２次元自己相関関数は、一般に次の性質を持つ。信号が自己回帰的である場合、自己相関関数は遅れ時間の増大につれてゼロに収束し、ランダム性が強いほど収束が早くなる。これに対して、移動平均的な場合、自己相関関数はゼロに収束しない。２次元自己相関関数は次式で表現される。

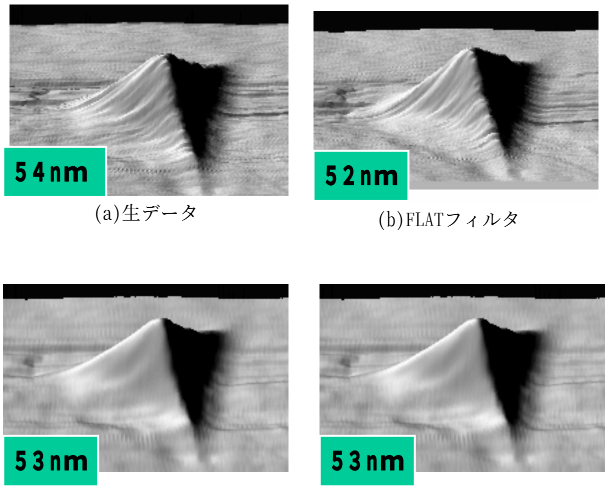
$$R(\tau_x, \tau_y) = \{1/(M-i)(N-j)\} \times \Sigma\Sigma\, Z(X_k, Y_l) \cdot Z(X_{k+i}, Y_{l+j}) \qquad (4)$$

τ_x, τ_y：遅れ　　M, N：最大遅れ数
X,Y：２次元座標　　Z：信号値

表面性状の不規則性を数値化する目的で、遅れによらず±１の間に入るように（４）式の２次元自己相関関数を次式で正規化する。

$$NR(\tau_x,\ \tau_y) = R(\tau_x,\ \tau_y) \,/\, R(0,\ 0) \qquad (5)$$

次に、（５）式で示される正規化２次元自己相関係数をゼロ平面で閉じたときの体積を求めた後、最大遅れ数で除算することによって、次式を得る。



(a)生データ　(b)FLATフィルタ
（c）ウェーブレットフィルタ　(d)FIRローパスフィルタ

図４　ナノインデンターの圧痕観察結果

$$p = \{1/(MN)\} \times \Sigma\Sigma \ |NR(\tau_x, \tau_y)| \qquad (6)$$

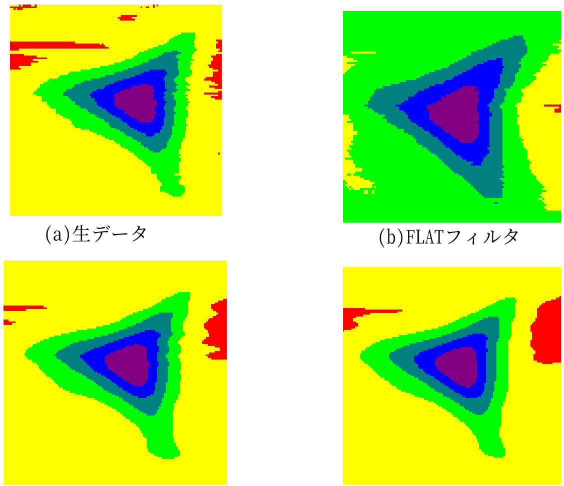
除算値ｐは０から１の実数値をとり、ランダム性が高いほど小さな値になる。

３．実験結果

3.1 フィルタリング

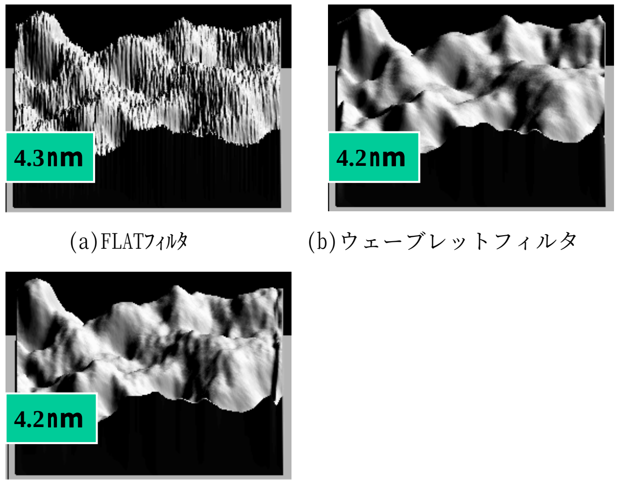
山谷の数が少ない表面性状の例として原子間力顕微鏡によるナノインデンターの圧痕観察結果をフィルタリングの対象に選択した。ちなみにナノインデンターの押し付け力は1.5mNとした。観察結果は３角錐の窪み状になった。上下を逆転させて表示すると**図４**の様な突起状に表せる。図４(a)は、生データであり、横方向に多数の筋が見えるのが分かる。これは測定誤差であり、これを取り除く目的で、原子間力顕微鏡に装備されているFLATフィルタを使用すると、図４(b)になる。同図では筋を取り除けていないことが分かる。そこで、外部のパソコンで作成したレベル２の１次元ウェーブレットフィルタと正規化遮断周波数 0.1のカイザー窓関数付きFIRローパスフィルタを適用した。フィルタリングの結果を、それぞれ図４(c)(d)に示す。両図においては、きれいに筋を取り除けていることが分かる。ちなみに、図４の左下の数値は最大高低差を表しており、(a)～(d)で大差はない。

グレースケールでこれらの三角錐を表示した結果が**図５**である。図５(b)は、原子間力顕微鏡に装備されているFLATフィルタを適用した結果であり、圧痕の右辺が”く”型に歪んでいるのが分かる。外部のパソコンで作成したウェーブレットフィルタとFIRローパスフィルタを適用した結果を、それぞれ図５(c)(d)に示す。両図には、ほとんど違いがない。しかし圧痕の左稜線の近傍を詳細に観察すると(c)は(d)よりシャープな形状を保っている。このことから、FIRローパスフィルタでは、角を丸める性質があるのに対して、ウェーブレットフィルタは角を丸めずに不連続性状をそのまま抽出できていることが分かる。



(a)生データ　(b)FLATフィルタ
（c）ウェーブレットフィルタ　(d)FIRローパスフィルタ

図５　ナノインデンターの圧痕観察結果



(a)FLATﾌｨﾙﾀ　(b)ウェーブレットフィルタ
（c)FIRローパスフィルタ

図６　DVDピット間観察結果

図６は、DVDのピットとピットの間を原子間力顕微鏡で観察した結果である。計測領域が200ｎｍ角であり、PVは4.2ｎｍ程度である。これは表面性状として、極めて平滑な例である。図６(a)は装置のFLATフィルタを適用した結果であり、多数の筋が誤差として入っている。図６(b)(c)は、それぞれウェーブレットフィルタとカイザー窓関数付きのFIRローパスフィルタを適用した結果である。両図においては多数の筋が除去されている。こ

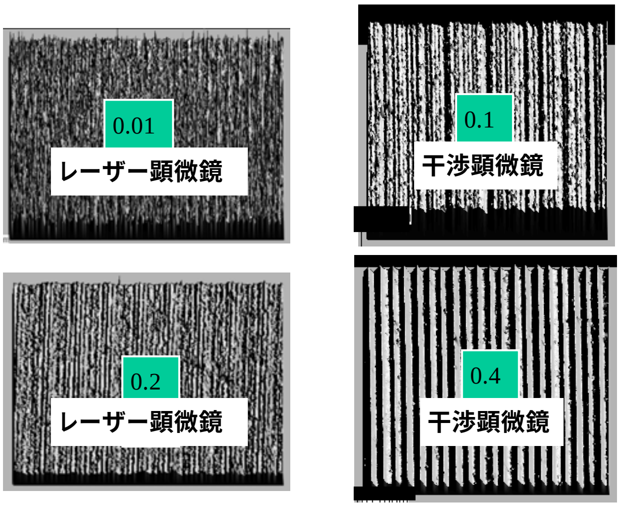


図７　不規則性の数値化

のように、ＰＶが小さい場合に生ずる多数の筋に対しても、作成したフィルタを適用することによって、これを除去し、現実に近い結果を得ることができた。

3.2 不規則性の数値化

超精密旋削面を干渉顕微鏡によって計測した３次元表面性状と通常の旋削面をレーザ顕微鏡で観察した結果を**図７**に示す。ただし、旋削面を持つ試料は直径60mmの円筒形状であるが、粗さのみを強調する目的で、回帰２次曲面を求めた後、これを除去する処理をしている。本方式によって演算した数値を図７に併記した。不規則、ランダム性が高いほど数値は小さく、規則性が高いほど数値が大きくなることが分かる。

４．結び

３次元表面性状のフィルタリングと特徴量の抽出を行った。特に、原子間力顕微鏡、干渉顕微鏡、レーザ顕微鏡などによって測定した３次元表面性状のデータを外部のパソコンに取り込み、獲得データに信号処理、あるいはデータ処理を行うことによって、出力結果をより分かりやすくすること、及び、従来、主観的に扱われていた情報を客観的に評価する方法の開発に重点を置いた。

フィルタリング、不規則性の数値化とも、満足できる結果を得た。ただし、低倍率の対物レンズを用いてレーザ顕微鏡で通常の旋削面を測定する際、ピークを十分に測定できなかった点も付記する。

文献

1)走査型プローブ顕微鏡取扱説明書、セイコー電子工業株式会社
2)伊藤ほか：愛知県産業技術研究所研究報告,2,48(2003)
3)中野ほか:ウェーブレットによる信号処理と画像処理,(1999)共立出版
4)P.Vaidyanathan：マルチレート信号処理とフィルタバンク,(2002)科学技術出版
5)櫻井鉄也:MATLAB/Scilabで理解する数値計算,(2003)東京大学出版